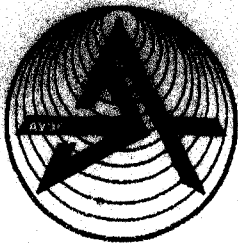


6М.01.000/
В 689



Некоммерческое
акционерное
общество

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ**

Кафедра электрических
станций и
электроэнергетических
систем

**ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Методические указания и задания по выполнению
расчетно-графических работ
для магистрантов научно-педагогической
специальности 6М071800 – Электроэнергетика

Алматы 2018

СОСТАВИТЕЛИ: Ж.К. Оржанова. Волновые процессы и перенапряжения в электрических сетях. Методические указания и задания по выполнению расчетно-графических работ для магистрантов научно-педагогической специальности 6M071800 – Электроэнергетика. – Алматы: АУЭС, 2018. - 22с.

Методические указания предназначены для выполнения расчетно-графических работ по дисциплине «Волновые процессы и перенапряжения в электрических сетях», содержат: задания, методические указания к выполнению РГР, варианты контрольных вопросов, а также список необходимой литературы.

Методические указания предназначены для студентов научно-педагогической магистратуры для специальности 6N071800 – Электроэнергетика.

Ил.9, табл.9, библиогр. –7 назв.

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2018г.

1 Общие положения

Предметом изучения курса «Волновые процессы и перенапряжения в электрических сетях» являются теоретические вопросы возникновения и развития волновых процессов в электрических сетях и системах, распространение волн в проводах, преломление и отражение волн, волновые процессы в обмотках трансформаторов и машин. Излагаются основы теории развития колебаний в обмотках трансформаторов, волновые процессы в автотрансформаторах и регулировочных трансформаторах, особенности волновых процессов в трехфазных трансформаторах, переход волн между обмотками трансформатора, исследуются волновые процессы в обмотках на моделях.

Изучаются вопросы защиты подстанции от волн атмосферного происхождения, набегающих на подстанцию с воздушной линии; защита генераторов от индуктированных перенапряжений; защита генераторов при трансформаторной связи с воздушными линиями.

Излагаются основы теории развития перенапряжений в электрических системах (перенапряжения при дуговых замыканиях на землю, перенапряжения в дальних линиях электропередач, резонансные перенапряжения в электрических системах) и техники защиты от перенапряжений. Изучаются поведение сетей при различных видах заземления нейтрали.

Цель расчетно-графических работ – привить навыки самостоятельной работы, выявить знания студентов по данной дисциплине и умение применять эти знания в дальнейшей профессиональной деятельности. В процессе выполнения РГР студент должен самостоятельно работать с учебной и научно-технической литературой, уметь обобщать полученные знания, делать обоснованные выводы.

Методическая разработка включает три расчетно-графические работы, в каждую из которых включены по одной задаче и контрольные вопросы.

Исходные данные для выполнения РГР строго индивидуальны. Каждый студент определяет свой вариант задания в зависимости от учебного года изучения данной дисциплины по трем признакам – по последней и предпоследней цифрам шифра и первой букве своей фамилии.

Согласно таблице 1, по последней цифре шифра (номера зачетной книжки) с учетом года изучения дисциплины устанавливается номер варианта исходных данных первой группы.

Аналогично, согласно таблице 2, устанавливается по предпоследней цифре номера зачетной книжки номер варианта исходных данных второй группы и согласно первой буквы фамилии по таблице 3 – номер варианта исходных данных третьей группы.

Вариант контрольных вопросов в каждой РГР принимается по последней цифре шифра независимо от года обучения.

Т а б л и ц а 1 – Исходные данные первой группы

Учебный год	Последняя цифра зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2018/2019	X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I
2019/2020	II	I	IV	III	VI	VII	VIII	V	X	IX
2020/2021	V	IV	III	II	I	X	IX	VIII	VII	VI
2021/2022	I	II	V	IV	III	VI	X	VII	IX	VIII
2022/2023	IX	VIII	IX	VI	VII	I	II	IV	III	V

Т а б л и ц а 2 – Исходные данные второй группы

Учебный год	Предпоследняя цифра зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2018/2019	X	VIII	IX	VI	VII	I	II	IV	III	V
2019/2020	II	I	IV	III	VI	VII	VIII	V	X	IX
2020/2021	I	II	V	IV	III	VI	X	VII	IX	VIII
2021/2022	X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I
2022/2023	V	IV	III	II	I	X	IX	VIII	VII	VI

Т а б л и ц а 3 – Исходные данные третьей группы

Учебный год	Первая буква фамилии									
	А, Л, Х	Б,М, Ц	В,Н,Ч	Г,О,Ш	Д, П,Щ	Е,Р,Э	Ж,С,Ю	З,Т,Я	И,У,	К, Ф,
2018/2019	IX	VIII	X	VI	VII	I	II	IV	III	V
2019/2020	II	I	IV	III	VI	VII	VIII	V	X	IX
2020/2021	I	II	V	IV	III	VI	X	VII	IX	VIII
2021/2022	X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I
2022/2023	V	IV	III	II	I	X	IX	VIII	VII	VI

2 Задания и методические указания для выполнения расчетно-графической работы №1. Атмосферные перенапряжения и защитное действие молниеотводов

2.1 Условие задания

Рассчитать и построить зону защиты для ОРУ 220 (110, 35) кВ от прямых ударов молнии (ПУМ). Молниеотводы расположить на порталах шинпровода и отдельно стоящие согласно разработанному ОРУ в РГР 2 (вид сверху сверху по ячейкам трансформатора и линий электропередач).

Для предложенной подстанции (рисунки 1-3) требуется:

1) Определить наиболее оптимальные места расположения молниеотводов, обеспечивающих защиту оборудования подстанции и их высоту.

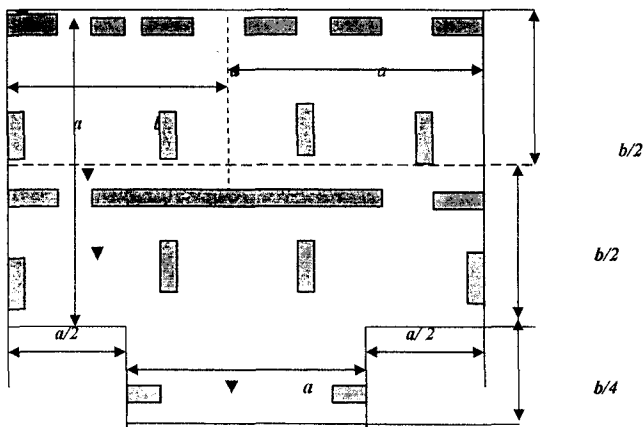
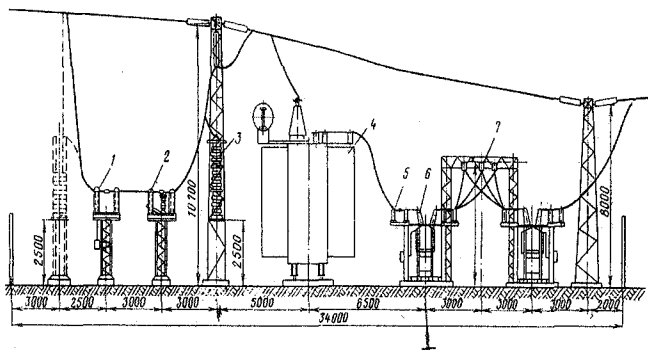


Рисунок 1 – Компоновка ОРУ на 110 кВ



1 — разъединитель, 110 кВ; 2 — отделитель; 3 — разрядник; 4 — трансформатор; 5 — разъединитель, 35 кВ; 6 — выключатель, 35 кВ; 7 — портал для ОРУ 35 кВ; 8 — короткозамыкатель, 110кВ; 9 — заземляющий разъединитель; 10 — блок типа Б-2 с ТН; 11 — блок типа Б-1 с выключателем; 12 — КРУН 6—10 кВ.

Рисунок 2 — Общий вид подстанции КТП-110/35 6—10 кВ (вид сбоку)

В таблице 4 приведены основные параметры для расчета зон молниезащиты: a и b — размеры подстанции, одна из которых приведена на рисунках 1 и 3; h — высота защищаемого объекта. На рисунке 1 знак \blacktriangledown возле

расположенными в узлах сетки по периметру. Шаг сетки рекомендуется принимать в пределах 5 – 10 м, а длину вертикальных электродов в пределах от трёх до десяти метров.

В однострансформаторной подстанции КТП-110/35/6–10 кВ содержится открытое соединительное устройство ОРУ 35 кВ. ОРУ 35 кВ состоит из блоков заводского изготовления. В таком ОРУ все оборудование смонтировано на заводе и готовыми блоками (типов Б-1 и Б-2) поставляется для монтажа.

2.2 Теоретические сведения

2.2.1 Общие сведения о молнии.

Молния представляет собой электрический разряд длиной в несколько километров, развивающийся между грозовым облаком и землей или каким-либо наземным сооружением. Удар молнии может привести к неблагоприятным последствиям: повреждение сооружений, разрушение электропроводки, электрических и электронных устройств, нанесение вреда людям. С целью уменьшения риска появления подобного рода последствий применяются молниеотводные установки, рассчитанные на непосредственный контакт с каналом молнии и отводящие ее ток в землю.

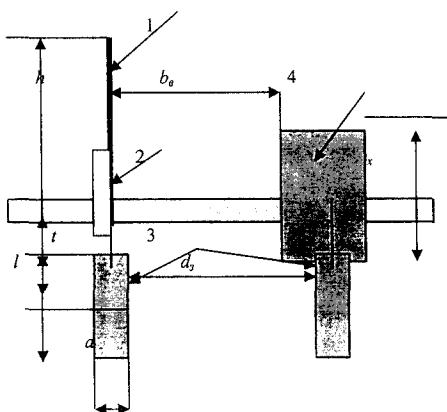


Рисунок 4 – Стержневой отдельно стоящий молниеотвод

Защитное действие молниеотвода основано на свойстве молнии с большей вероятностью поражать более высокие предметы по сравнению с расположенными рядом объектами меньшей высоты. Молниеотводная установка обычно состоит из нескольких частей (рисунок 4):

- молниеприёмник 1, установленный на опоре, который притягивает на себя разряд молнии;

- проводник (токоотвод) 2, по которому разряд, без причинения вреда сооружению 4, «стекает» к заземлителю;
- заземлители 3, передающие разряд в землю.

На практике эти элементы образуют единую конструкцию, например, металлическая мачта или ферма здания представляет собой молниеприёмник, опору и токоотвод одновременно.

Помимо использования молниеотводов, заземлители также предохраняют людей и животных от поражения током и обеспечивают надёжную работу оборудования (ограничивают импульсное напряжение на металлических конструкциях).

2.2.3 Особенности построения и конструкции молниеотводов.

Молниеотводами оборудуют все устройства, потребляющие электроэнергию: силовые трансформаторы, коммуникационное оборудование, системы видеонаблюдения, оборудование локальных вычислительных сетей (ЛВС), системы передачи данных, управления, контроля и измерения и др.

Опоры стержневых молниеотводов должны быть рассчитаны на механическую прочность как свободно стоящие конструкции, а опоры тросовых молниеотводов - с учетом натяжения троса и действия на него ветровой и гололедной нагрузки.

Опоры отдельно стоящих молниеотводов могут выполняться из стали любой марки, железобетона или дерева.

Стержневые молниеприемники должны быть изготовлены из стали любой марки сечением не менее 100 мм и длиной не менее 200 мм и защищены от коррозии оцинкованием, лужением или покраской.

Тросовые молниеприемники должны быть выполнены из стальных многопроволочных канатов сечением не менее 35 мм. Соединения молниеприемников с токоотводами и токоотводов с заземлителями должны выполняться, как правило, сваркой, а при недопустимости огневых работ разрешается выполнение болтовых соединений с переходным сопротивлением не более 0,05 Ом при обязательном ежегодном контроле последнего перед началом грозового сезона.

2.2.4 Расчет зон защиты молниеотводами.

Расчет зоны защиты одиночным молниеотводом. Рассчитаем зону защиты подстанции одиночным стержневым молниеотводом (рисунок 5).

В таблице 3 приведены размеры зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода. Зона защиты одиночным стержневым молниеотводом, высотой h , представляет собой круговой конус (рисунок 5), вершина которого находится на высоте $h_0 < h$.

На уровне земли зона защиты образует круг радиусом r_0 . Горизонтальное сечение зоны защиты на высоте защищаемого сооружения h_x представляет собой круг радиусом r_x .

Зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов высотой $h \leq 100$ м имеют следующие габаритные размеры.

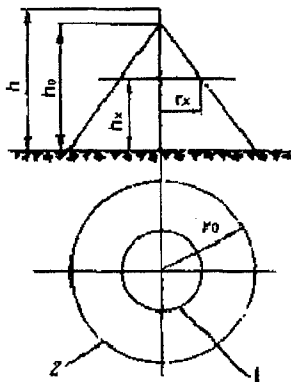


Рисунок 5 – Зона защиты одиночным стержневым молниеотводом

$$h_0 = 0,85h; \quad (2.1)$$

$$r_0 = 1,2h; \quad (2.2)$$

$$r_x = (1,1 - 0,002h)(h - h_x / 0,85). \quad (2.3)$$

Т а б л и ц а 5 – Размеры зоны защиты одиночного стержневого МО

Степень надежности защиты, P	Высота молниеотвода, h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса на уровне грунта r_0 , м
0,9	От 0 до 100	$0,85 h$	$1,2 h$
	От 100 до 150	$0,85 h$	$(1,2 - 10^{-3}(h-100)) h$
0,95	От 0 до 150	$0,92 h$	$0,8 h$
0,99	От 30 до 30	$0,8 h$	$1,5 h$
	От 30 до 100	$0,8 h$	$(0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h-30))h$
0,999	От 0 до 100	$0,7 h$	$0,6 h$
0,995	От 0 до 150	$0,85 h$	$(1,1 - 0,002 h) h$

Расчет зоны защиты подстанции для двух молниеотводов равной высоты. Зона защиты двойным стержневым молниеотводом высотой $h < 150$ м представлена на рисунке 6. Торцевые области зоны защиты определяются как зоны одиночных стержневых молниеотводов, габаритные размеры которых h_0 , r_0 , r_{x1} , r_{x2} определяются по формулам (2.1), (2.3). Внутренние

области зон защиты двойного стержневого молниеотвода рассчитываются по следующим формулам при $h < L < 2h$:

$$h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} h)(L - h), \quad (2.4)$$

$$r_c = r_0, \quad (2.5)$$

$$r_{cx1} = r_c(h_c - h_x) / h_c, \quad (2.6)$$

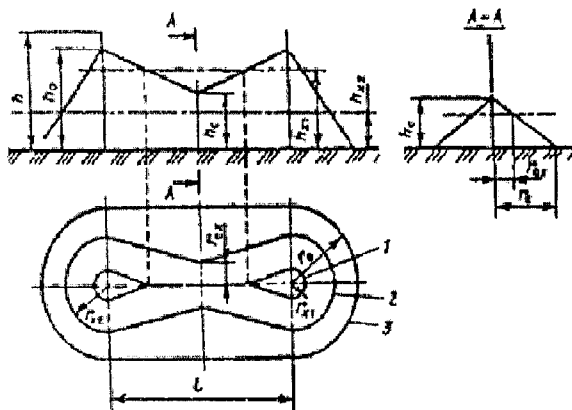
$$r_{cx2} = r_c(h_c - h_x) / h_c. \quad (2.7)$$

На рисунке 7 представлены зоны защиты отдельно стоящими двойными стержневыми МО.

Заземлители. Проектирование заземлений при низких материало-монтажных затратах является наиболее эффективным, принимая во внимание следующие сведения.

В зависимости от выполняемой задачи заземления подразделяются на:

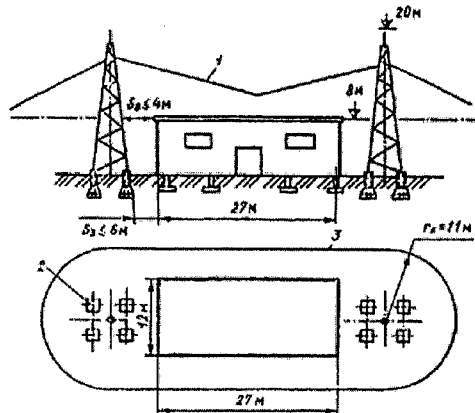
– заземления безопасности, предохраняющие людей и животных от поражения электротоком;



1 – граница зоны защиты на уровне h_{x1} ; 2 – то же на уровне h_{x2} ;

3 – то же на уровне земли.

Рисунок 6 – Зона защиты двойного стержневого молниеотвода нормальную и надежную



- 1 – граница зоны защиты; 2 – заземлители-подножки фундамента;
3 – зона защиты на отметке 8,0 м.

Рисунок 7 – Молниезащита здания 1-й категории отдельно стоящими двойными стержневыми молниеотводами

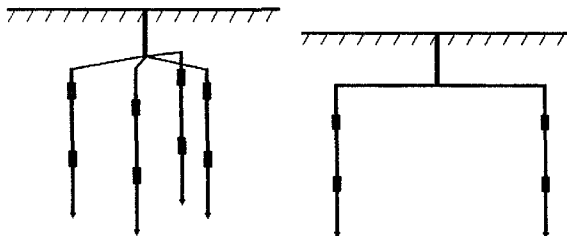
- рабочие - целенаправленное соединение заземлителя с электрической цепью для создания эквипотенциального условного уровня;
- грозозащитные – заземления, отводящие ударный ток грозового разряда.

Заземления безопасности и рабочие заземления соединяются с грозозащитными заземлениями напрямую, либо с помощью заземляющего дросселя, задачей которого является устранение мешающих токов и волн высокой частоты.

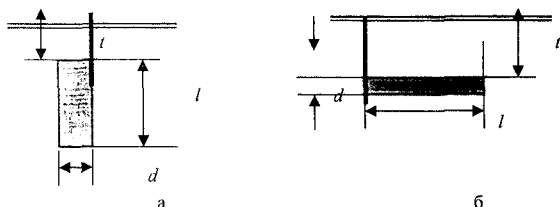
Главным параметром грозозащитного и рабочего заземлений является активное сопротивление заземлителя. Низкое сопротивление заземлителя зависит от сопротивления почвы, а не от его длины. С практической и экономической точек зрения лучше (если способствуют этому почвенные условия) применять одинарные вертикальные заземлители.

Молниеотводные заземлители, о правильном срабатывании которых решает не только активное сопротивление, но прежде всего импеданс, уменьшающий воздействие электродвижущих сил сопутствующих отводу заряда грозовых разрядов, требуют совершенно другого подхода. На рисунках 8 и 9 приведены некоторые конфигурации заземляющих систем.

Правильно спроектированный и установленный контур заземления должен характеризоваться: низким активным постоянным сопротивлением на протяжении всего эксплуатационного периода, хорошей устойчивостью к коррозии, способностью отвода высокочастотных пиковых токов, долгим сроком службы - не менее 30 лет.



а – четырехплечий заземлитель; б – параллельный заземлитель.
Рисунок 8 – Схемы подключения заземлителей



а – вертикальный; б – горизонтальный, здесь l – длина заземлителя; d – диаметр заземлителя; t – глубина заложения заземлителя.

Рисунок 9 – Электроды заземлителей

При проектировании заземлений следует учитывать *почвенные условия*. Удельное сопротивление почвы решительным образом влияет на способ сооружения заземления. Удельное сопротивление почвы влияет на способ сооружения заземления и зависит от: а) *физического состава почвы* - в зависимости от вида почвы ее удельное сопротивление колеблется в пределах от нескольких до нескольких тысяч омметров; б) *влажности почвы* - повышенная влажность почвы в значительной степени понижает ее удельное сопротивление; в) *pH почвы* - до сооружения системы заземления следует проверить реакцию почвы с целью подбора металла. Для меди подходящей является щелочная среда с $pH > 7$, для алюминия, олова и оцинкованных металлов - кислая среда с $pH < 7$; г) *температуры почвы* - изменение температуры почвы имеет значительное влияние на ее удельное сопротивление.

В таблице 6 приведены некоторые значения удельного сопротивления различных видов грунта.

Т а б л и ц а 6 – Зависимость удельного сопротивления от почвы

Вид почвы	болотистая почва	глинистый песок и глина	песок	торф	гравий	скала
Удельное сопротивление почвы (Ом м)	2-2,7	4-150	90 - 8000	свыше 200	300 - 500	свыше 1000

Для грозозащитных заземлителей используются вертикальные и горизонтальные электроды, уложенные на глубине 0,5 – 1 м от поверхности земли (рисунок 9). Сопротивление растеканию тока промышленной частоты может быть рассчитано по формулам:

– для вертикального трубчатого электрода:

$$R_{\infty} = \frac{0,366 \rho}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right); \quad (2.8)$$

– для вертикального электрода из угловой стали:

$$R_{\infty} = \frac{0,366 \rho}{l} \left(\lg \frac{2d}{b} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right); \quad (2.9)$$

– для горизонтального заземлителя из полосовой стали 31:

$$R_{\infty} = \frac{0,366 \rho}{l} \lg \frac{2l^2}{bt}. \quad (2.10)$$

Заземляющий контур подстанции включает в себя искусственный заземлитель (обычно в виде сетки) и естественные заземлители. Стационарное сопротивление заземлителя R_c (при токе 50 Гц) в виде сетки с вертикальными электродами определяется по формуле:

$$R_c = A / S^{0,5}. \quad (2.11)$$

Коэффициент A зависит от отношения длины l вертикальных электродов к $S^{0,5}$ (S - площадь, занятая заземлителем), значения A приведены в таблице 7.

Т а б л и ц а 7 – Значения коэффициента A

$l/S^{0,5}$	0	0,05	0,1	0,2	0,5
A	0,44	0,40	0,37	0,33	0,26

В нашем случае заземлитель находится в III-ей климатической зоне, а измерение удельного сопротивления проводилось при низкой влажности грунта, поэтому $k_c = 1,5$. Расчетное удельное сопротивление грунта ρ :

$$\rho = k_c \rho, \quad (2.12)$$

где k_c - сезонный коэффициент.

Расчет импульсного сопротивления заземления подстанции производится для основного заземлителя подстанции в виде сетки со стационарным сопротивлением R_c .

Импульсный коэффициент заземлителя α_n определяется по формуле:

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{1500 \cdot \sqrt{S}}{(\rho + 320) \cdot (I_m + 45)}} \quad (2.13)$$

Импульсный коэффициент α_n зависит от значения проходящего через заземлитель тока молнии I_m .

Импульсное сопротивление заземлителя определим по формуле:

$$R_n = \alpha_n R_c \quad (2.14)$$

Заземлители на станциях и подстанциях выполняются общими для обеспечения безопасности персонала, для заземления нейтралей трансформаторов и генераторов и для заземления молниеотводов, т.е. для целей грозозащиты.

При поражении молниеотводов ток молнии, стекающий в заземление подстанции, вызывает на этом заземлении подъем напряжения ($I_m R_n$), которое может вызвать обратное перекрытие изоляции.

По правилам ПУЭ в электроустановках с большими токами замыкания на землю (подстанции 110 кВ и выше) сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 0,5 Ом.

2.2.5 Определение допустимых расстояний по воздуху и земле между молниеотводом и заземлителем оборудования.

Определим вероятность перекрытия по воздуху с порталов на систему сборных шин. Безопасное расстояние b между порталами и электрооборудованием определяется по формуле:

$$b \geq \frac{a_m L_0 h_x}{E_g} \quad (2.15)$$

где h_x – высота защищаемого объекта, $h_x = 10,7$ м;

a_m – скорость нарастания тока, кА/мкс;

E_g – разрядная напряженность поля для воздушных промежутков при импульсных напряжениях ($E_g = 500$ кВ/м).

Погонная индуктивность портала $L_0 = 0,5$ мкГн/м .

Определим вероятности перекрытия по земле.

Перекрытие по земле может возникнуть в случае невыполнения следующего условия:

$$d \geq \frac{I_m R_n}{E_g} \quad (2.16)$$

где d – расстояние до объекта по земле;

E_g – разрядная напряженность поля по земле, $E_g = 300$ кВ/м;

R_u – сопротивления заземлителя при прохождении тока молнии, Ом.

Сопротивление заземлителя выбрано, исходя из того, что заземлитель имеет форму вертикального стержня длиной $l = 5$ м из круглой стали диаметром $d = 10$ мм. Внешний вид заземлителя представлен на рисунке 4.

2.2.6 Опасное значение тока молнии.

При $R_u = 130$ Ом опасное значение тока молнии вычисляется по формуле:

$$I_{\text{м.оп}} = \frac{U_{\text{и.доп}}}{R_u}, \quad (2.17)$$

где $U_{\text{и.доп}}$ – допустимое импульсное напряжение для внутренней изоляции обмотки трансформатора.

$$U_{\text{и.доп}} = 1,1(U_{\text{п.и.}} - 0,5 \cdot U_{\text{ном}}), \quad (2.18)$$

где $U_{\text{п.и.}}$ - испытательное напряжение изоляции обмотки;

$U_{\text{ном}}$ – действующее значение номинального напряжения.

2.3 Контрольные вопросы

2.3.1 Каковы параметры грозового разряда и их примерные величины?

2.3.2 Каковы защитные характеристики стержневого молниеотвода?

2.3.3 Поясните, по какой причине молниеотвод должен быть удален от защищаемого объекта?

2.3.4 Что называется «защитным углом» тросового молниеотвода и какова его рекомендуемая величина?

2.3.5 Изложите последовательность расчета наименьшей ширины зоны защиты для двух стержневых молниеотводов.

2.3.6 Изложите последовательность расчета радиуса защиты стержневого молниеотвода при его высоте 30м.

2.3.7 Изложите последовательность графического построения защитной зоны для трех и четырех стержневых молниеотводов.

2.3.8 При выполнении каких условий следует считать, что линия в полете защищена от прямых поражений при использовании двух стержневых молниеотводов.

2.3.9 Почему ток молнии, поражающий провод или трос в середине пролета, следует уменьшать вдвое по сравнению со статистическим, предусматривающим поражение хорошо заземленных объектов?

2.9.10 Каковы параметры грозового разряда и их примерные величины?

3 Расчетно-графическая работа №2. Развитие колебаний в обмотках трансформаторов

3.1 Условие задачи

Рассчитать и построить в координатах $U, x/l$, огибающую максимальных градиентов вдоль обмотки двухобмоточного трансформатора, при попадании на ввод его электромагнитной волны перенапряжения с прямоугольным фронтом и амплитудой U_0 . Обмотка трансформатора имеет n катушек, емкость каждой катушки относительно корпуса ΔC и между катушками ΔK по всей длине l обмотки (схема замещения обмотки трансформатора только по емкостям справедлива, когда на вход ее попадает крутая форма напряжения). В расчете свободной составляющей распределенного напряжения учесть первые три гармоники, амплитуды которых определяются по формулам:

– для трансформатора с заземленной нейтралью:

$$A_k = \frac{2}{k\pi} \cdot \frac{U_0}{1 + \frac{K}{C}(k\pi)^2}, \quad (3.1)$$

– для трансформатора с изолированной нейтралью:

$$A'_k = \frac{4}{(2k-1)\pi} \cdot \frac{U_0}{\left\{ 1 + \frac{K}{C} \left[\frac{(2k-1)\pi}{2} \right]^2 \right\}}, \quad (3.2)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ – первая (основная гармоника) имеет амплитуду A_1 и A'_1 .

3.2 Методические указания к решению задачи

3.2.1 Найти коэффициент αl по параметрам обмотки из таблицы 8:

$$\alpha l = \sqrt{C/K} = \sqrt{(\Delta C \cdot n / \Delta K \cdot n) \cdot l^2}. \quad (3.3)$$

3.2.2 Построить начальное распределенное напряжение для схемы замещения обмотки трансформатора, принимая значение переменной величины $x/l = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$, для выражения:

$$u_n(x) \cong U_0 e^{-\alpha x} = U_0 e^{-\alpha l \left(\frac{x}{l} \right)}. \quad (3.4)$$

3.2.3 Построить функцию напряжения в установившемся режиме для схемы замещения согласно режиму нейтрали и переменной величины x/l .

3.2.4 Рассчитать амплитуду гармоники A_k , построить свободную составляющую распределенного напряжения $U_{св1}$ в координатах x/l с учетом того, что если потенциалы в начале и в конце обмотки фиксированы (заземленная нейтраль), то имеем узлы высших гармоник в этих местах обмотки и целое число полувольт по всей ее длине; если потенциал фиксирован в начале обмотки и неопределен в конце (изолированная нейтраль), то имеем узел высших гармоник в начале и пучок их в конце обмотки и поэтому целое число четверть-волн напряжений по всей длине обмотки. Рассчитать первые три гармоники для любого режима нейтрали. Проверить полученную огибающую свободной составляющей напряжения путем разности амплитуд напряжений начального распределения и установившегося:

$$U_{св2} = U_{нач} - U_{уст} \quad (3.5)$$

Если $U_{св1}$ и $U_{св2}$ отличаются друг от друга на 10% и более, то изменить основные параметры ΔC , уменьшить в 2-5 раз, а ΔK увеличить в 2-3 раза и повторить расчеты.

3.2.5 Построить максимальную огибающую распределенного напряжения U_{max} по обмотке трансформатора как сумму векторов по абсолютной величине свободной составляющей и установившейся:

$$U_{max} = IU_{св1} + IU_{уст1} \quad (3.6)$$

3.2.6 Сделать заключение по распределению U_{max} , где в начале или в конце обмотки трансформатора необходимо усилить изоляцию, чтобы исключить пробой ее от набегающей волны перенапряжения и предложить мероприятия.

Т а б л и ц а 8 – Варианты заданий для выполнения РГР

№ вар	U_0 , кВ	n, шт	ΔC	ΔK	Режим нейтрали
I	100	10	10	400	заземл. и изолир.,
II	150	15	15	750	заземл. и изолир.,
III	200	20	20	800	заземл. и изолир.,
IV	250	25	25	900	заземл. и изолир.,
V	300	30	30	1000	заземл. и изолир.,
VI	400	40	10	1000	заземл. и изолир.,
VII	500	50	15	900	заземл. и изолир.,
VIII	600	60	20	800	заземл. и изолир.,
IX	700	70	25	750	заземл. и изолир.,
X	1000	80	30	600	заземл. и изолир.,

3.3 Контрольные вопросы

3.3.1 Какой вид имеет схема замещения обмотки трансформатора для анализа волновых переходных процессов?

3.3.2 В чем сходство и различие схем замещения обмотки трансформатора и длинной линии?

3.3.3 На какие этапы можно разбить переходный процесс в обмотке?

3.3.4 Что такое начальное и конечное распределение напряжения по обмотке?

3.3.5 На трансформатор воздействует прямоугольный импульс (ступенчатое напряжение). Как выявить на осциллограмме напряжения значение начального напряжения в данной точке обмотки?

3.3.6 Какой процесс называют волнами градиента?

3.3.7 От чего зависит скорость распространения волны градиента по обмотке?

3.3.8 Можно ли с достаточной точностью определить максимальные напряжения в обмотках автотрансформатора путем построения огибающей максимальных потенциалов (по начальному и конечному распределениям)?

3.3.9 От чего зависит первая собственная частота колебаний трансформатора?

3.3.10 Какой вид имеет амплитудно-частотная характеристики трансформатора?

4 Расчетно-графическая работа №3. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью

4.1 Условие задачи

Рассчитать емкостной ток замыкания на землю для сети с заданным $U_{ном}$. Сравнить расчетный ток и критический для данного класса с учетом характера сетей (тип опоры и т.д.) и при необходимости выбрать тип и номер отпайки ДГР (для реакторов типа РЗДСОМ). Исходные данные в таблице 9.

4.2 Методические указания к решению задачи

Решение данной задачи необходимо начать с изучения разделов ПТЭ и ПУЭ, в которых нормированы предельно допустимые токи замыкания на землю и требования к ДГР и его настройке. Величина емкостного тока замыкания на землю может быть оценена по формуле:

$$I_c = 3\omega U_\phi (C_{\Sigma 1} + C_{\Sigma 2}) \cdot 10^{-6}, \quad (4.1)$$

где $\omega = 314,16$ 1/с – угловая частота;

$C_{\Sigma 1}$ – суммарная фазовая емкость линий (воздушных и кабельных) в мкФ;

$C_{\Sigma 2}$ – суммарная емкость подстанционного оборудования (при отсутствии достоверных данных может быть принята приближенно $C_{\Sigma 2} \approx 0,1C_{\Sigma 1}$).

Т а б л и ц а 9 – Варианты заданий для выполнения РГР

№ вар	Исходные данные 1 группы			Исходные данные 2 группы		Исходные данные 3 группы
	Номинальное напряжение ВЛ, кВ	Протяженность сети, км		Усредненная погонная емкость мкФ/км		
		ВЛ	КЛ	ВЛ	КЛ	Тип опор для ВЛ
I	6	60	-	0,0043	-	ж/б
II	6	-	35	-	0,27	-
III	6	-	75	-	0,25	-
IV	6	20	30	0,0043	0,25	дерево
V	10	80	-	0,0047	-	ж/б
VI	10	-	60	-	0,202	-
VII	10	25	15	0,0047	0,18	дерево
VIII	35	80	-	0,0044	-	ж/б
IX	35	140	-	0,0048	-	дерево
X	35	25	5	0,0045	0,19	ж/б

Индуктивный ток дугогасящего реактора $I_p = \frac{U_\phi}{x_p}$ должен быть равен емкостному, но в реакторах со ступенчатым регулированием этого добиться невозможно за счет большой разности токов смежных ответвлений, поэтому рекомендуется настройка с перекомпенсацией. При степени компенсации $K_L = I_p / I_c$ остаточный ток может быть найден как:

$$I_s^{(0)} = I_c (1 - K_L). \quad (4.2)$$

4.3 Контрольные вопросы

4.3.1 Приведите числовые значения принятых уровней внутренних перенапряжений в установках различных номинальных напряжений.

4.3.2 Какие перенапряжения называются внутренними и от каких параметров оборудования они зависят?

4.3.3 Перечислите наиболее характерные случаи возникновения коммутационных и резонансных перенапряжений и укажите причины их возникновения.

4.3.4 Изложите методику расчета числа элементов в гирлянде изоляторов воздушной линии по длинам участков утечки тока и по средней напряженности мокроразрядных напряжений.

4.3.5 Поясните причины возникновения повторных зажиганий дуги между контактами выключателей.

4.3.6 В каких целях могут возникнуть резонансные перенапряжения на рабочей частоте?

4.3.7 Укажите, к каким последствиям может привести явление феррорезонанса.

4.3.8 Поясните принцип работы дугогасящей катушки и шунтового реактора.

4.3.9 Почему при наличии АПВ выключатель, работающий без повторных зажиганий, не исключает появления коммутационных перенапряжений на линиях?

4.3.10 Поясните принцип работы дугогасящего трансформатора.

Список литературы

- 1 Кадомская К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них.– Новосибирск, Энергия,2006. – 350 с.
- 2 Расчет электрических полей устройств высокого напряжения./ под ред.Е.С.Колечицкого.– М.: МЭИ, 2008. – 248 с.
- 3 Техника высоких напряжений. Л.П.Чайкина.– М.: Маршрут, 2005. – 232 с.
- 4 Техника высоких напряжений.Под ред. Богатенкова И.М. и др. – Санкт – Петербург, Энергоатомиздат, 2003. – 350 с.
- 5 Техника высоких напряжений. Под общей редакцией д.т.н., профессора Г.С. Кучинского. – Санкт – Петербург, Энергоатомиздат, 2003. – 606 с.
- 6 Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. /Под ред. В.П.Ларионова. – М.: ЭАИ, 1986. – 464 с.
- 7 Техника высоких напряжений. Теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 472 с.

Содержание

1 Общие положения.....	3
2 Задания и методические указания для выполнения расчетно-графической работы №1. Атмосферные перенапряжения и защитное действие молниеотводов.....	4
3 Расчетно-графическая работа №2. Развитие колебаний в обмотках трансформаторов.....	15
4 Расчетно-графическая работа №3. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью.....	18
Список литературы	21

Жанар Керимбековна Оржанова

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Методические указания и задания по выполнению
расчетно-графических работ
для магистрантов научно-педагогической
специальности 6М071800 – Электроэнергетика

Редактор Л.Т. Сластихина
Специалист по стандартизации Н.К. Молдабекова

Подписано в печать *10.12.18*
Тираж 15 экз.
Объем 1,25 уч. изд. л.

Формат 60x84 1/16
Бумага типографская №1
Заказ № *762* Цена 625 тенге

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013 Алматы, ул. Байтурсынова, 126